

Козлова Т.В.,
к.т.н., доцент кафедри землевпорядних технологій
Шквар Є.О.,
д.т.н., професор кафедри вищої та обчислювальної математики
(Національний авіаційний університет, м. Київ)

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ГРАВІТАЦІЙНОЇ ТЕЧІЇ В ШАРІ СТОКУ ДОЩОВИХ ОПАДІВ НА ШОРСТКІЙ ПОХИЛІЙ ПОВЕРХНІ

УДК 625.717

Побудовано математичну модель і метод розрахунку течії водної плівки в шарі стоку дощових опадів на плоскій похилій штучно шорсткій поверхні на основі спрощеної форми рівнянь руху в'язкої рідини та напівемпіричного опису турбулентності разом з урахуванням особливостей взаємодії потоку рідини з нерегулярною структурою рельєфу поверхні.

Построены математическая модель и метод расчета течения водной пленки в слое стока дождевых осадков на плоской наклонной искусственно шероховатой поверхности на основе упрощенной формы уравнений движения вязкой жидкости и полуэмпирического описания турбулентности вместе с учетом особенностей взаимодействия потока жидкости с нерегулярной структурой рельефа поверхности.

Kozlova T.V., Shkvar Ye.O. MATHEMATICAL MODEL OF GRAVITY FLOW IN A RAINFALL LAYER OF RUNOFF ON A ROUGH INCLINED SURFACE. The mathematical model and method of calculation of the rainfall water film flow on a flat inclined artificially rough surface is proposed. Elaborated model is based on a simplified form of the viscous liquid motion governing equations and semi-empirical description of turbulence together with accounting the phenomena of liquid flow and irregular surface structure interaction.

Ключові слова: шар стоку, дощові опади, ухил поверхні, шорсткість, математична модель, турбулентна течія

Вступ

Найважливішою проблемою експлуатації авіаційного транспорту є забезпечення безпеки польотів, яка значною мірою визначається дією на повітряне судно (ПС) несприятливих метеорологічних явищ і, зокрема, інтенсивних опадів. Для відведення останніх зі злітно-посадкової смуги (ЗПС) застосовується

симетричний поперечний ухил її поверхні i (тангенс кута між нею та горизонтальною площиною, або, враховуючи малість останнього, самий кут, рад.), нормування якого регламентується Сертифікаційними вимогами до цивільних аеродромів України [1] та Керівництвом з сертифікації аеродромів ІКАО [2] значеннями $i = 0,015$ для ЗПС класів А – Г та $i = 0,02$ для ЗПС класів Д, Е. У Додатку 14 до Конвенції про міжнародну цивільну авіацію [3] формулюються рекомендації щодо того, що поперечний ухил бажано має бути симетричним та не перевищувати вищенаведених значень, а також не бути меншим за $i = 0,01$. Наведені рекомендації у частині визначення норм поперечних ухилів не зазнали суттєвих змін у порівнянні з відповідними регламентаційними документами, прийнятими на початку 80-х років [4, 5], у тому числі і з Керівництвом з проектування аеродромів ІКАО [6], які, у свою чергу, наслідували відповідні документи середини 75-х років. Водночас, важливість забезпечення і достовірного експериментального визначення коефіцієнта зчеплення визначається Керівництвом з аеропортових служб ІКАО [7] як пріоритетна проблема, що викликає загальне занепокоєння. Необхідність вивчення дії зливових опадів на характеристики повітряних суден підтверджується результатами аналізу ряду авіаційних катастроф, пов'язаних з погодними умовами [8 – 10]. Поширення та інтенсифікація експлуатації нових зразків авіаційної техніки як від надважких широкофюзеляжних до легких і надлегких ПС обумовлюють зростання інтересу до виконання обґрунтованих оцінок необхідних величин поперечних ухилів та розробки відповідних надійних методів їх визначення.

Аналіз досліджень і публікацій

Відповідно до матеріалів Міжнародної організації цивільної авіації (ІКАО) [7, 11] мокра ЗПС є однією з причин скочування або викочування літака на етапах розбігу та пробігу. Так при точному заході на посадку наявність вологи на смузі з'явилася причиною 64% викочувань літака по відношенню до викочувань з інших причин. Вирішення задачі про належне відведення води з ЗПС здійснюється на основі експериментальних даних або шляхом використання простих

емпіричних моделей стоку. Оскільки подібні залежності для визначення товщини шару стоку не завжди приводять до результатів, що узгоджуються між собою, а також з відомими експериментальними даними [12] в широкому діапазоні умов, що представляють інтерес для вирішення даної задачі, правомірним є висновок про необхідність удосконалення вживаних підходів до опису формування стоку.

Розгляд задач формування течій рідких плівок є актуальним не тільки для авіації, а й для автомобільного транспорту, хімічної промисловості та енергомашинобудування. Великий внесок у вирішення подібних задач внесли експериментальні роботи школи проф. М.Е. Дейча [13], виконані в Московському енергетичному інституті, а також експериментальні і теоретичні розробки що проводяться впродовж тривалого періоду часу під керівництвом проф. О.М. Яхна на кафедрі гідроаеродинаміки та механотроніки НТУУ “КПІ” [14]. Відомі дотепер роботи у напрямі математичного моделювання течій водних плівок обмежені, значною мірою, розглядом ламінарних режимів течій як плівок, так і супутнього потоку газу [15]. Реальна течія водної плівки на поверхнях ПС і ЗПС, а також рух супутнього потоку повітря в примежовому шарі на елементах ПС будуть формуватися під впливом турбулізації від крапель дощу, а також шорсткості обтічної поверхні (наприклад, поверхні ЗПС), що вже не дозволяє розглядати дані течії як ламінарні.

Таким чином, задача моделювання течій водних плівок з урахуванням впливу шорсткості обтічної поверхні, дій зовнішніх чинників та турбулентності є актуальною як в теоретичному, так і в прикладному аспектах.

Постановка завдання

Метою статті є розробка математичної моделі стоку дощових опадів з шорсткої похилої плоскої поверхні, яка дозволить при заданій інтенсивності дощу і для будь-якого заданого перерізу шару стоку від початку його формування визначати товщину водної плівки, розподіл швидкості по товщині, а також середню швидкість у цьому перерізі.

Математична модель гравітаційної течії водної плівки в шарі стоку дощових опадів на шорсткій поверхні

У основу розробки цієї моделі покладено гіпотезу про подібний до розвинутого турбулентний характер руху рідини в шарі водної плівки, не зважаючи на малу товщину останньої, що обумовлено дією дощових крапель та шорсткістю поверхні. Як відомо [16], розподіл швидкості по глибині потоку при турбулентному режимі течії на шорсткій поверхні за винятком безпосередньої близькості до неї достатньо надійно може бути описаний формулою

$$\frac{u}{v_*} = \frac{1}{k} \ln \frac{y}{\Delta} + B, \quad (1)$$

де u – швидкість течії на відстані y від поверхні; м/с; y – нормальна до обтічної поверхні координата; $v_* = \sqrt{\tau_w / \rho_L}$ – динамічна швидкість, що визначається за напруженням зсуву τ_w ; ρ_L – густина рідини; Δ – середня висота виступів шорсткості обтічної поверхні; B – стала логарифмічного закону, що є функцією параметра $\Delta v_* / \nu_L$; ν_L – кінематичний коефіцієнт в'язкості рідини; k – емпірична стала Кармана.

Реалізована на першому етапі дослідження спроба безпосереднього інтегрування формули (1) по товщині водної плівки з метою визначення середньої швидкості і глибини водної плівки привела до результатів, що не узгоджуються з відомими експериментальними даними [12, 17]. Причина полягає в тому, що формула (1) традиційно застосовувалася для опису розподілу швидкості в турбулентних примежових шарах, товщина яких h значно перевищує середню висоту виступів рельєфу шорстких поверхонь Δ [16], тоді як для шару стоку з ЗПС висота Δ є сумірною, а в деяких випадках значно перевищує товщину водної плівки h . Отже, для даної течії значна частина шару води рухається між елементами шорсткості. З цієї причини необхідно крім опису впливу шорсткості поверхні на розподіл швидкості формулою (1) врахувати також ефект захарщення потоку елементами шорсткості. У роботі [18] з метою моделювання

цього ефекту введений коефіцієнт захаращення β , визначений як відношення відкритої для потоку частини площі поверхні усередині шорсткості до площі повної поверхні.

Адаптуємо цей підхід для моделювання течії частини шару стоку усередині шару шорсткості, який має той самий порядок, що і товщина зсувного потоку. При компактному розташуванні елементів шорсткості поблизу їх основи $\beta \rightarrow 0$, а на вершинах $\beta \rightarrow 1$. У загальному випадку для визначення залежності β від координати y , введемо у розгляд наступну функцію

$$\beta = \left(\frac{y}{\Delta} \right)^p, \quad (2)$$

де p – показник степеня, що враховує характер зміни поперечних розмірів елементів шорсткості по їх висоті.

Урахування ефекту захаращення поблизу основ бугорків шорсткості приводить до нефізичних результатів відносно розподілу напруження тертя τ при $y \rightarrow 0$. З цієї причини, а також у зв'язку з втратою справедливості формули (1) при $y \rightarrow 0$, вважатимемо справедливим припущення, що товщина шару стоку h визначатиметься лише його логарифмічною ділянкою, яка бере початок на деякій відстані y_s від основи елементів шорсткості. Розподіл швидкості при $y < y_s$ апроксимуватимемо лінійною функцією:

$$u = u_s \frac{y}{y_s}, \quad (3)$$

де u_s визначається при $y = y_s$. Припустимість такого підходу обумовлена як важкістю достовірного визначення для реальних поверхонь розташування площини, яку слід розглядати основою елементів шорсткості, так і сильною загальмованістю течії в околі неї внаслідок значного захаращення.

Спрощене рівняння руху в'язкої рідини без урахування захаращення, в якому враховано дію сили тяжіння і нехтується конвективними складовими і дифузійним членом у напрямку розвитку течії, може бути представлено у вигляді

$$\frac{1}{\rho_L} \frac{d\tau}{dy} = -g \sin i, \quad (4)$$

де τ – дотичне напруження в шарі стоку.

Застосування (4) з урахуванням зроблених вище припущень є справедливим для вже усталеної ділянки течії, яка за даними [19] починається на відстані $L = 50\bar{h}$ від початку стоку (\bar{h} – середня глибина шару стоку). Крім того, рівняння (4) є строго справедливим для частини шару стоку над шорсткістю і наближено справедливо в частини шару стоку між елементами шорсткості, де загарбання ще не є значним, тобто при $y_s < y < \Delta$.

Інтегрування (4) спільно з граничною умовою на зовнішній межі стоку $\tau = 0$ при $y = h + y_s$ дозволяє знайти розподіл $\tau(y)$ у вигляді

$$\tau = \rho_L g (\sin i) h \left(1 - \frac{y - y_s}{h}\right). \quad (5)$$

При $y = y_s$ з (5) визначимо найбільше значення τ для шару стоку $\tau_s = \rho_L g (\sin i) h$.

У області $0 \leq y \leq y_s$ течія має істотно тривимірний характер, теоретичний опис якого зробити проблематично. У зв'язку з цим, а також враховуючи малу товщину даної області, приймається припущення, що зміна τ по її товщині в межах $0 \leq y \leq y_s$ є відсутньою. Таким чином, напруження тертя на поверхні τ_w буде дорівнювати τ_s , що дозволяє визначити динамічну швидкість наступним чином

$$v_* = \sqrt{\tau_w / \rho_L} = \sqrt{gh \sin i}. \quad (6)$$

Згідно сформульованих припущень представимо схематично розподіли швидкості $u(y)$ та $\tau(y)$ в шарі стоку і виділимо три характерні області досліджуваної течії, які відповідають наступним умовам: $0 < y \leq y_s$, $y_s < y \leq \Delta$, $\Delta < y \leq h + \Delta$ (рис. 1).

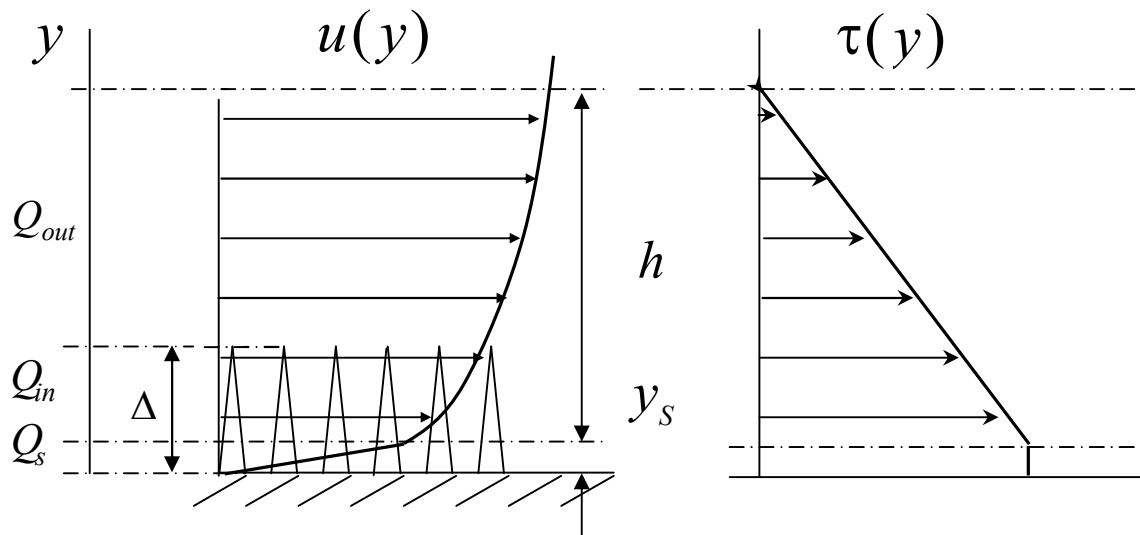


Рис. 1. Схематизація розподілів швидкості $u(y)$
та напруження тертя $\tau(y)$ в шарі стоку

Шляхом інтегрування формули Буссінеска $\tau_{tl} = \rho_L \nu_{tl} \frac{du}{dy}$ в області $y_s < y < h$, де турбулентна в'язкість ν_{tl} значно перевищує молекулярну ($\nu_{tl} \gg \nu_L$), нехтуючи останньою і задаючи кінематичний коефіцієнт турбулентної в'язкості відповідно до відомих алгебраїчних підходів напівемпіричного моделювання пристінної турбулентності [119, 121] виразом $\nu_{tl} = k y \nu_*$, а для опису турбулентних напружень, застосовуючи (6), одержуємо формулу для розподілу швидкості

$$\frac{u}{\nu_*} = \frac{1}{k} \ln \frac{y}{\Delta} - \frac{y}{hk} + \frac{y_s}{hk} \ln \frac{y \nu_*}{\nu_L} + B. \quad (7)$$

Ця формула враховує змінність τ по глибині шару плівки рідини і з цієї причини для вирішення даної задачі віддамо перевагу їй, а не (1). Тому саме формула (7) використовується надалі для опису розподілу швидкості при $y_s \leq y \leq h$. Середню по товщині швидкість течії визначатимемо з виразу

$$\nu_{сер} = \frac{Q}{h + y_s}. \quad (8)$$

Тут Q – об'ємна витрата рідини через поперечний перетин шару стоку одиничної ширини, що визначається як сума витрат у визначених вище його характерних областях, а саме

$$Q = Q_s + Q_{in} + Q_{out}, \quad (9)$$

де Q_s – витрата рідини в області $0 < y < y_s$; Q_{in} – витрата в області $y_s < y \leq \Delta$; Q_{out} – витрата в частині шару стоку, що знаходиться вище шорсткості $\Delta < y \leq h + \Delta$.

Знайдемо Q_s , виконавши інтегрування формули (3), помноженої на коефіцієнт захарашення по глибині шару стоку в області $0 < y < y_s$, тобто

$$Q_s = \int_0^{y_s} \beta u dy, \quad (10)$$

де $\beta = \left(\frac{y}{\Delta}\right)^p$. При визначенні Q_{in} можливі два випадки. У першому випадку вся водна плівка знаходиться нижче за верхню межу шорсткості Δ , тоді як у другому випадку передбачається, що частина шару стоку лежить вище цієї межі. Визначимо Q_{in} , інтегруючи формулу (7), помножену на коефіцієнт захарашення β по глибині шару стоку в областях $y_s < y \leq h + y_s$ – для першого випадку (Q_{in1}), $y_s < y \leq \Delta$ – для другого випадку (Q_{in2}).

$$\begin{aligned} Q_{in1} = & \frac{\beta_{(h+y_s)}(h+y_s)}{p+1} \left[\frac{1}{k} \left(\ln \frac{h+y_s}{\Delta} - \frac{1}{p+1} \right) + \right. \\ & \left. + \frac{1}{kh} \left\{ y_s \left(\ln \frac{(h+y_s)v_*}{v_L} - \frac{1}{p+1} \right) - (h+y_s) \frac{p+1}{p+2} \right\} + B \right] - \\ & - \frac{y_s \beta_{(y_s)}}{p+1} \left[\frac{1}{k} \left(\ln \frac{y_s}{\Delta} - \frac{1}{p+1} \right) + B + \frac{1}{kh} \left\{ y_s \left(\ln \frac{y_s v_*}{v_L} - \frac{1}{p+1} \right) - y_s \frac{p+1}{p+2} \right\} \right], \\ Q_{in2} = & \frac{\beta_{(\Delta)} \Delta}{p+1} \left[-\frac{1}{k(p+1)} + \frac{1}{kh} \left\{ y_s \left(\ln \frac{\Delta v_*}{v_L} - \frac{1}{p+1} \right) - \Delta \frac{p+1}{p+2} \right\} + B \right] - \\ & - \frac{y_s \beta_{(\Delta)}}{p+1} \left[\frac{1}{k} \left(\ln \frac{y_s}{\Delta} - \frac{1}{p+1} \right) + B + \frac{1}{kh} \left\{ y_s \left(\ln \frac{y_s v_*}{v_L} - \frac{1}{p+1} \right) - y_s \frac{p+1}{p+2} \right\} \right]. \end{aligned} \quad (11)$$

Об'ємну витрату в частині шару водної плівки, що знаходиться вище за шорсткість Q_{out} , визначимо безпосередньою інтегруванням формули (3) по товщині течії в області $\Delta < y \leq h + y_s$

$$Q_{out} = (h + y_s) \left[\frac{1}{k} \left(\ln \frac{h + y_s}{\Delta} - 1 \right) + B \right] + \frac{h + y_s}{hk} \left[y_s \left(\ln \frac{(h + y_s)v_*}{v_L} - 1 \right) - \frac{h + y_s}{2} \right] - \Delta \left[B - \frac{1}{k} \right] - \frac{\Delta}{hk} \left[y_s \left(\ln \frac{\Delta v_*}{v_L} - 1 \right) - \frac{\Delta}{2} \right]. \quad (12)$$

Витрата Q_{out} розраховується тільки для другого випадку, а в першому випадку вважається $Q_{out} = 0$.

З урахуванням запропонованої структури течії товщину шару стоку h можна визначити з інтегральної форми рівняння нерозривності, що описує баланс витрат в шарі стоку

$$(h + y_s)v_{cep} = aL \quad \text{або} \quad h = \frac{aL}{v_{cep}} - y_s. \quad (13)$$

де a - інтенсивність опадів.

Для остаточного замикання розробленої моделі течії водної плівки на шорсткій поверхні слід визначити значення величин k , y_s , B , p . Сталу k відповідно до результатів [20] приймаємо $k = 0,45$. Відмінність обраного значення від загальноприйнятих $k = 0,4 - 0,41$ пояснюється особливостями формування водної плівки, викликаними збурюючими впливами шорсткості і крапель дощу. Значення y_s може бути призначено з різних міркувань. Проте, при значному діапазоні висот шорсткості, під який розроблялася математична модель, представляється найбільш істотним і доцільним визначити величину y_s пропорційною Δ . Прийнятні результати забезпечив підхід до визначення y_s як висоти, на яку зменшується товщина шару рідини усередині шорсткості при нехтуванні захаращенням елементами шорсткості шару водної плівки. У цьому випадку залежність $y_s = f(\Delta)$ задається виразом

$$y_s = \frac{p}{p+1} \Delta. \quad (14)$$

Стала логарифмічного закону B визначається як функція параметра $\Delta v_* / v_L$, причому вигляд цієї функції залежить від виду шорсткості. Оскільки різні види покриття, що використовуються в дорожньому і аеродромному будівництві, мають структуру шорсткості, що сильно відрізняється, а також унаслідок відсутності експериментальних даних по розподілу локальної швидкості водної плівки, був проведений обчислювальний експеримент. Мета цього експерименту полягала у виборі виду залежності $B = f(\Delta v_* / v_L)$, а також у визначенні значення показника степеня p , яке найкраще відповідає течіям на даних покриттях. Основу обчислювального експерименту складала описана вище математична модель, експериментальні дані по середній швидкості стоку Л.Т. Абрамова для цементобетонних покриттів ($\Delta = 0,3$ мм) [16], а також експериментальні і розрахункові результати ІСАО по товщині шару стоку на бетонних покриттях ($\Delta = 2$ мм) [12]. Результати обчислювального експерименту показали, що найкраща відповідність розрахунків експериментальним даним досягається при виборі $p = 0,3$ і залежності $B = f(\Delta v_* / \gamma_L)$ вигляду

$$B = 5,75 + 2,75 \operatorname{th} \left(\ln \frac{\Delta v_*}{v_L} \right) \quad (15)$$

Розглянемо докладніше структуру і властивості цієї формули. Як впливає з її структури, при малих значеннях $\Delta v_* / v_L$ аргумент гіперболічного тангенса буде також малий, що дозволяє, використовуючи асимптотичні властивості функції $\operatorname{th}(x) \rightarrow x$, спростити (15), представивши його у вигляді

$$B = 5,75 + 2,75 \ln \frac{\Delta v_*}{v_L}$$

Одержана формула за значеннями коефіцієнтів близька до виразу

$$B = C + \frac{1}{k} \ln \frac{\Delta v_*}{v_L},$$

яке при його використанні для визначення постійної логарифмічного закону B в рівнянні (1) приведе до результату

$$\frac{u}{v_*} = \frac{1}{k} \ln \frac{y v_*}{v_L} + C,$$

що відповідає режиму гідродинамічної гладкості обтічної поверхні. У цих формулах $C = 4,9 - 5,5$ – усталений діапазон значень константи логарифмічного закону при турбулентному обтіканні гладкої поверхні.

При великих величинах $\Delta v_* / v_L$ значення B , відповідно до рівняння (15), перестає змінюватися і стає рівним $B = 8,5$. Ця ситуація відповідає виходу на авто модельний (розвинений) режим впливу шорсткості [17, 20].

Таким чином, формула (15) коректно описує фізичний прояв асимптотичних властивостей впливу шорсткості як при малих, так і при великих значеннях приведеної до масштабу закону стінки її висоти $\Delta v_* / v_L$. Разом з тим, визначення залежності $B = f(\Delta v_* / v_L)$ у вигляді (15) обумовлено тією обставиною, що спроби використання апроксимацій відповідних даних як для піщаної щільноупакованої шорсткості, так і для технічної шорсткості [17, 20] (рис. 2, кола та ромби відповідно) не привели до прийнятної точності одержуваних результатів.

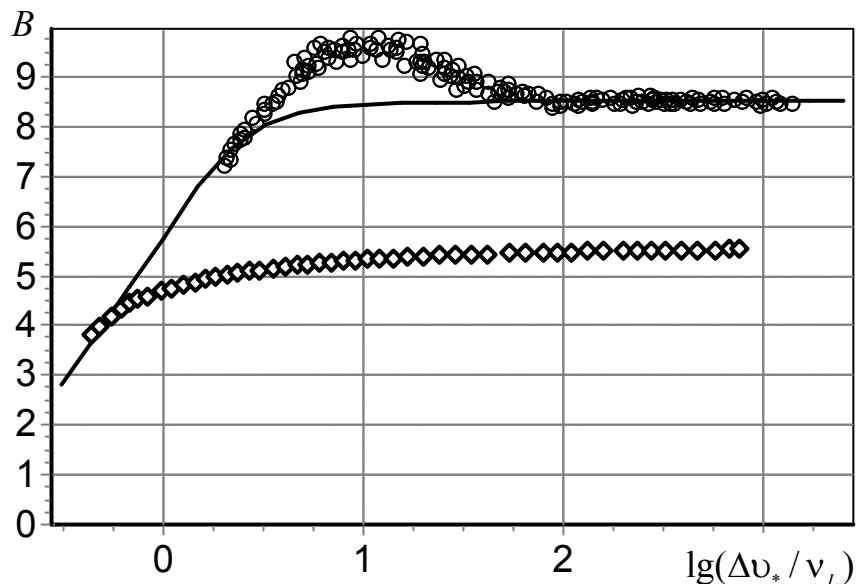


Рис. 2. Порівняння експериментальних залежностей $B(\Delta v_* / v_L)$ для піщаної щільноупакованої (кола) та технічної (ромби) видів шорсткості поверхні [20] з розрахунком за запропонованою формулою (15) (лінія)

Наведене на рис. 2 співставлення демонструє, що формула (15) модифікує по відношенню до прояву впливу піщаної щільноупакованої шорсткості лише область, яка відповідає перехідному режиму від гідродинамічної гладкості до автотельності, усуваючи немонотонність залежності $B = f(\Delta v_* / v_L)$ на цій ділянці. Необхідність проведеної модифікації дозволяє припустити, що для широкого діапазону умов формування шару стоку дощових опадів з похилих штучно шорстких поверхонь реалізується саме перехідний режим прояву шорсткості. Таким чином, визначення виду залежності $B = f(\Delta v_* / v_L)$ повністю завершує розробку математичної моделі шару стоку, яка в остаточному вигляді представляється набором формул (3) – (15). Зважаючи на громіздкість одержаних формул зупинимося докладніше на питанні побудови процедур розрахунку для різних практично актуальних розрахункових випадків.

Формули (8) – (15) утворюють систему трансцендентних нелінійних рівнянь, розв'язання якої дозволяє визначити значення товщини h і середньої швидкості $v_{сер}$ водної плівки при заданих значеннях a , L та i . Розв'язок цієї системи може бути одержаний методом ітерацій. У разі потреби знаходження $v_{сер}$ при заданому значенні h розрахункова процедура спрощується і зводиться до розв'язання рівняння (8) спільно з виразами (9) – (12), (14), (15), в які h входить явним чином. Вирази (3) і (7) описують розподіл швидкості в шарі водної плівки, а (5) дозволяє розрахувати розподіл дотичного напруження по товщині шару стоку.

Описані вище алгоритми розрахунків були реалізовані у вигляді відповідних програм, що забезпечило можливість швидкого виконання розрахунків характеристик шару стоку. Це, у свою чергу, дозволяє перейти до розгляду питань, пов'язаних з тестуванням моделі шляхом порівняння розрахованих на її основі характеристик шару стоку з експериментальними і розрахунковими результатами інших авторів.

Результати тестування моделі течії в шарі стоку

На рис. 3 результати розрахунків середньої швидкості течії в шарі стоку $v_{сер}$ в залежності від її товщини h за розробленою вище моделлю у вигляді формул (8 – 15) – (лінія 1) порівнюються з розрахунками за формулами за рядом відомих емпіричних формул [21 – 27], а саме: $v_{сер} = 0,381(\sin i)^{0,47} h^{0,87}$ – лінія 2; Манінга $v_{сер} = h^{2/3} \sqrt{i} / n$ – лінія 3; Павловського $v_{сер} = C \sqrt{hi}$, $C = h^y / n$, $y = 2,5\sqrt{n} - 0,75\sqrt{h} - 0,13$ – лінія 4; Агроскіна $v_{сер} = C \sqrt{hi}$, $C = 1/n + 17,72 \lg h$ – лінія 5; Бурке $v_{сер} = 472,6 h i^{0,4}$ – лінія 6; Альтшуля $v_{сер} = C \sqrt{hi}$, $C = 25[h / ((80n)^6 + 0,025 / \sqrt{hi})]^{1/6}$ або $C = 24 \lg[2h / (\Delta + 0,036 / \sqrt{hi})]$ – лінії 7,8; Полякова $v_{сер} = C \sqrt{hi}$, $C = h^y / n$, $y = 3,9 n^{0,75}$ – лінія 9; Гончарова $v_{сер} = 23,9(h / \Delta)^{0,2} \sqrt{hi}$ – лінія 10; для умов, що відповідали експериментам Абрамова (ухил обтічної поверхні $i = 0,01$, середня висота виступів шорсткості поверхні $\Delta = 0,3$ мм) – кола [16]. Тут n – гідравлічний коефіцієнт шорсткості, який для зазначених вище умов приймався $n = 0,012$, C – коефіцієнт Шезі. З проведеного порівняння видно, що результати розрахунків по розробленій моделі лежать в межах розкиду розрахункових даних, одержаних по інших формулах, але водночас демонструють наявність систематичної похибки $v_{сер}$ по відношенню до використаних експериментальних даних. Завищені по відношенню до розрахованих експериментальні значення можуть бути пояснені як доволі грубим наближеним методом визначення середньої швидкості (використання кульок-індикаторів та поплавків), а також і тим, що вимірювання при такому способі здійснювалися лише в шарі стоку, який знаходився над верхньою межею шорсткості, де локальні значення швидкості перевищують її середнє значення. Крім того, варто зазначити вагому перевагу розробленої моделі перед іншими гідравлічними залежностями, яка полягає як у більшому рівні теоретичного підґрунтя, що дає змогу враховувати як ефекти в'язкої взаємодії потоку та складного рельєфу обтічної поверхні, так і особливості формування процесів турбулентного обміну в досліджуваній течії, а також отримувати не лише інте-

гральні, а й локальні характеристики розвитку течії. Зокрема, розраховані на основі (3, 7, 15) профілі швидкості для різних значень товщини шару стоку h для розглянутих вище умов експерименту Абрамова представлені на рис. 4.

Урахування зазначених чинників, а також несуперечливість поведінки побудованої залежності $v_{сер}(h)$ як по відношенню до експериментальних даних, так і до прикладів застосування використаних емпіричних формул дозволяють кваліфікувати отримані результати розрахунків як цілком задовільні, а розроблену математичну модель (8-15) – як більш теоретично довершену і перспективну з позицій подальшого удосконалення та розвитку.

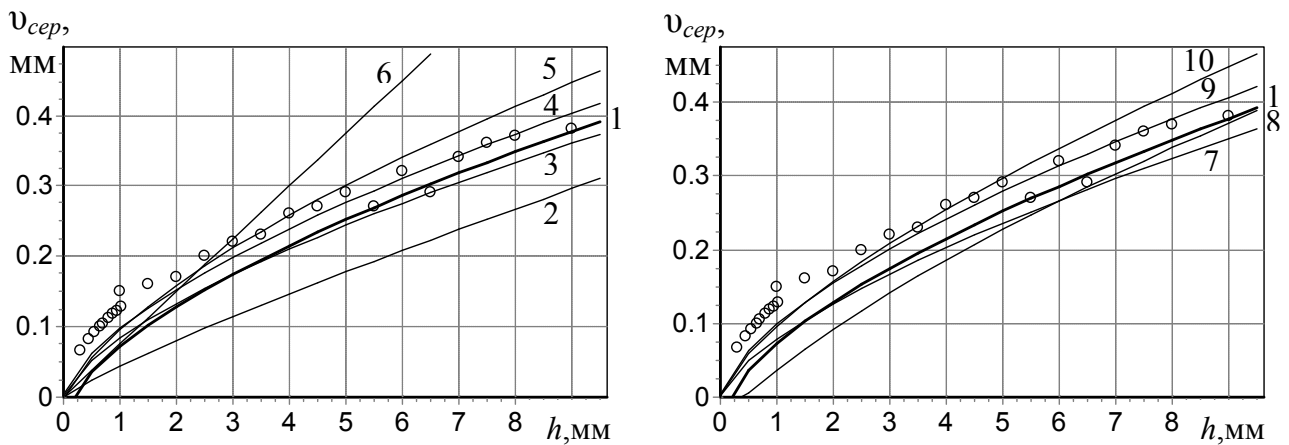


Рис. 3. Порівняння розрахованої за розробленою математичною моделлю залежності $v_{сер}(h)$ з результатами обчислень за емпіричними залежностями ряду авторів та експериментальними даними Абрамова [16]

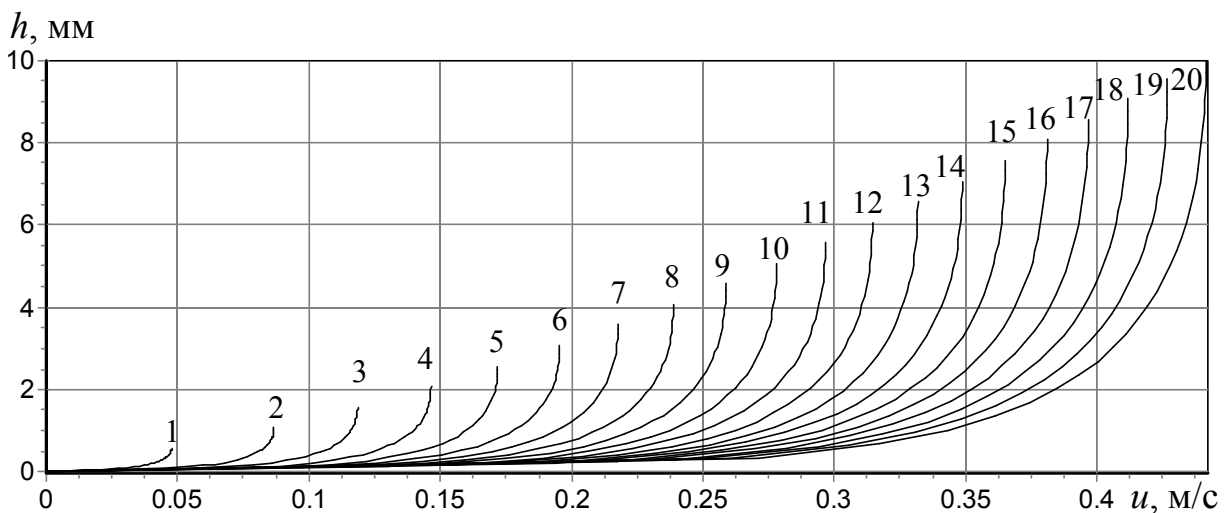


Рис. 4. Профілі швидкості $u(y)$ для різних значень висоти шару стоку h , мм:
0,5-(1); 1-(2); 1,5-(3); 2-(4); 2,5-(5); 3-(6); 3,5-(7); 4-(8); 4,5-(9); 5-(10); 5,5-(11);
6-(12); 6,5-(13); 7-(14); 7,5-(15); 8-(16); 8,5-(17); 9-(18); 9,5-(19); 10-(20).

Висновки

1. Розроблена модель течії шару стоку з похилої штучно шорсткої плоскої поверхні є більшою мірою теоретично обґрунтованою, ніж відомі підходи, оскільки заснована на використанні спрощеного представлення рівнянь руху в'язкої рідини, напівемпіричної теорії пристінної турбулентності, універсального логарифмічного розподілу швидкості по товщині течії, детальному врахуванню захащення потоку шаром шорсткості, причому містить параметри, що враховують не лише середню висоту елементів шорсткості, але і їх форму. Остання обставина робить надає даній моделі більшої універсальності для різноманітних практичних застосувань при деякому ускладненні розрахункових формул, що, проте, компенсується простотою програмної реалізації останніх.

2. Запропонована математична модель є більш інформативною, оскільки дає можливість розрахувати розподіл швидкостей і напружень тертя по товщині течії.

3. Найбільш істотною перевагою розробленої математичної моделі є можливість її узагальнення на складніший практично вагомий розрахунковий випадок, пов'язаний з урахуванням впливу наявності вітру на формування шару стоку дощових опадів з похилої шорсткої поверхні, що буде пріоритетним об'єктом прикладання подальших зусиль авторів.

Список літератури

1. Сертифікаційні вимоги до цивільних аеродромів України. Наказ Державіаслужби від 17.03.2006 № 201. – Режим доступу:
www.avia.gov.ua/uploads/documents/7475.doc.
2. Руководство по сертификации аэродромов / Doc 9774 ICAO. – Монреаль: ICAO, 2006.

3. Аэродромы. Конвенція про міжнародну цивільну авіацію. – П'яте видання, Том 1, додаток 14. – ІКАО, 2009.
4. Руководство по проектированию аэродромных покрытий. – М.: ГПИ и НИИ ГА, 01.01.1983. – 307 с.
5. СНиП II-47-80 Аэродромы / Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1980. – 59 с.
6. Руководство по проектированию аэродромов. – Второе издание (Doc 9157–AN/901). – Часть 3. Покрытия. – Монреаль: ІКАО, 1983. – 359 с.
7. Руководство по аэропортовым службам. Состояние поверхности покрытия. – Четвертое издание (Doc 9137 – AN/898). – Часть 2. Состояние поверхности покрытия. – Монреаль: ІКАО, 2002.
8. Дитенбергер М.А. Реконструкция условий авиакатастрофы в Новом Орлеане / М.А. Дитенбергер, П.А. Хейнс, Дж.К. Луэрс // Аэрокосм. техн. – 1976. – № 5. – С. 3 – 5.
9. Шибанов Г.П. Оценка безопасности полетов ЛА с использованием рейтинговой шкалы Купера-Харпера / Г.П. Шибанов // Проблемы безопасности полетов. – ВИНТИ, 1993. – № 9. – С. 44 – 48.
10. Weener E.F. Key elements of accident avoidance / E.F. Weener // World Aerosp. Technol. 91: Int. Rev. Aerosp. Des and Dev. – London, 1991. – P. 35 – 38.
11. Соколов В.С. Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации аэродромов (по материалам ІКАО) / В.С. Соколов, А.П. Виноградов // М., 1976. – 28 с.
12. Международная организация гражданской авиации. Восьмая аэронавигационная конференция. – Рабочий документ AN Conf /8-WP/33 от 16.01.1974. – 4 с.
13. Дейч М.Е. Газодинамика двухфазных сред / М.Е. Дейч, Г.А. Филиппов // М.: Энергоиздат, 1981. – 470 с.
14. Каминер А.А. Гидромеханика в инженерной практике / А.А. Каминер, О.М. Яхно. – К.: Техника, 1987. – 175 с.

15. Бояджиев Х. Массоперенос в движущихся пленках жидкости / Х. Бояджиев, В. Бешков. – М.: Мир, 1988. – 136 с.
16. Немчинов М.В. Сцепные качества дорожных покрытий и безопасность движения автомобилей / М.В. Немчинов. – М.: Транспорт, 1985. – 231 с.
17. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. – М.: Наука, 1974. – 711 с.
18. Тейлор Р.П. Расчет турбулентного поверхностного трения на шероховатой стенке методом дискретных элементов / Р.П. Тейлор, Х.В. Коулман, Б.К. Ходж // Теоретические основы инженерных расчетов. – 1985. – № 2. – С. 163 – 170.
19. Леви И.И. Моделирование гидравлических явлений / Л.: Энергия, 1967. – 235 с.
20. Михайлов В.Н. Влияние шероховатости корпуса судна на сопротивление воды / В.Н. Михайлов, Г.Н. Ткачук // Л.: Судостроение, 1971. – 152 с.
21. Querneigung und Fahrsicherheit. – Mogliche Einflusse der negativen Querneigung. – Institut fur Strassen und Verkehrswesen der Technischen Universitat. – Berlin, 1974. – Heft 173.
22. Справочник по гидравлике / В.А. Большаков, Ю.М. Константинов, В.Н. Попов и др. – К.: Вища шк., Головное изд., 1984. – 343 с.
23. Альтшуль А.Д. Гидравлические сопротивления. – М.: Недра, 1982. – 224 с.
24. Штеренлихт Д.В. Гидравлика. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 640 с.
25. Примеры гидравлических расчетов: Учеб. пособие для ВУЗов / Н.М. Константинов, Н.А. Петров, В.А. Александров и др. – М.: Транспорт, 1987. – 440 с.
26. Поляков А.В. Водоотвод и дренаж на аэродромах / А. В. Поляков; ЛВИКА. – Л.: ЛВИКА им. А.Ф. Можайского, 1966. – 471 с.
27. Burke K.E.A. Road geometry as it affects surface drainage-Pavement surface drainage / Pavement surface drainage symposium Sydney, 1980. – P.1–19, 42–62.